

学校编码: 10384

分类号 _____ 密级 _____

学 号: 20051302454

UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

时滞切换系统的鲁棒稳定性研究

Robust Stability of Switched Systems with Time-delay

陈 娜

指导教师姓名: 张 霄 力 副教授

专 业 名 称: 控制理论与控制工程

论文提交日期: 2 0 0 8 年 5 月

论文答辩时间: 2 0 0 8 年 月

学位授予日期: 2 0 0 8 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2008 年 05 月

厦门大学学位论文原创性声明

兹呈交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。
本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用学位论文的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交论文的纸质版和电子版，有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅，有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索，有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

本学位论文属于

1、保密（ ），在 年解密后适用本授权书。

2、不保密（ ）

（请在以上相应括号内打“√”）

作者签名： 日期： 年 月 日

导师签名： 日期： 年 月

摘 要

切换系统是一类重要的混杂系统,时滞切换系统是存在时滞的切换系统,这类系统的连续动态、离散动态和时滞相互作用,使得系统的动态特性极为复杂。本文利用共同李亚普诺夫函数方法、多李亚普诺夫函数方法、线性矩阵不等式方法及完备性条件等,研究了三类不同时滞切换系统鲁棒稳定性的问题。全文概述如下:

首先研究了一类具有外部干扰的时滞切换系统的鲁棒镇定问题。其中研究的外部扰动与通常的扰动在形式上存在较大差异,是又一类重要的扰动,对单个子系统来说是不满足匹配条件的,但是从整个切换系统来说又类似于匹配条件。利用共同李亚普诺夫函数方法和完备性条件,给出时滞切换系统可经状态反馈镇定的条件与切换策略的设计方法,使闭环系统在给定的切换策略下在其平衡点处渐近稳定。所得结果可适用于具有多个子系统的时滞切换系统。然后利用 MATLAB 中的 LMI 工具箱对一个具有三个子系统的时滞切换系统进行数值仿真,证明了结论的正确有效性。

其次研究了一类状态矩阵和控制输入矩阵同时具有不确定项的线性时滞切换系统的鲁棒控制器的设计问题。此类系统在结构和输入通道具有未知时变但有界的不确定性,还受到不满足匹配条件的外部扰动。在各子系统不需满足镇定的条件下,分别利用多李亚普诺夫函数方法和共同李亚普诺夫函数方法设计了切换系统的状态反馈鲁棒控制器及相应的切换策略,使不确定线性切换系统的状态在其平衡点处渐近稳定,得到了此类切换系统可状态反馈镇定的充分条件。所得结果均可用线性矩阵不等式方法求解,并且也通过仿真验证了结论的正确有效性。

最后研究了一类线性时变时滞切换系统的鲁棒镇定问题。利用共同李亚普诺夫函数方法和完备性条件,设计出切换策略以及经状态反馈的控制器,使闭环系统在给定的切换策略下在其平衡点处渐近稳定。最后通过数值仿真证明了结论的正确有效性。

全文的最后对全文工作进行了总结,并指出了下一步可深入研究的方向。

关键字: 切换系统; 时滞; 李亚普诺夫函数

Abstract

Switched system is an important class of Hybrid Dynamic System. Switched system with time-delay is a type of systems with switching and time-delay. Its behavior character is very complex because of the interaction among the continuous dynamic, discrete dynamic and time-delay. The problems of the state feedback robust stability for three different types of linear switched systems with time-delay are studied in this dissertation. These three problems can be solved by means of common Lyapunov function, multiple Lyapunov function, linear matrix inequalities, completeness condition and so on. All summarize as follows:

First, the problem of robust controllers of a class of switched system with time-delay and exterior disturbance is considered. A kind of robust state-feedback controller is constructed by using completeness condition and common Lyapunov function method, the switching strategy is also designed. With the given switching laws, the controllers guarantee that the states of closed-loop systems asymptotically converge to equilibrium point. In this chapter, the exterior disturbance is different from the ordinary disturbance, and it's another kind of very important disturbance. For every subsystem, it does not satisfy matching conditions, but for the whole switched systems, it's similar to the matching conditions. The results are available for the switched systems with time-delay which have several subsystems. The results are proved to be valid by using of digital simulation at last.

Second, we discuss the robust stabilization problem of a class of uncertain switched system with time-delay and uncertainty. This type of switched systems not only has uncertainty in structure and in input channel, but also has exterior disturbance which does not satisfy so-called matching condition. By using the completeness condition, multiple Lyapunov function method and common Lyapunov function method, the state feedback robust controllers of switched systems and switching strategy are designed on condition that each subsystem needn't to meet with the requirement of stabilization. The sufficient condition of robust stabilization for switched systems with time-delay is obtained. The results are proved to be valid by

simulation at last.

Last, we discuss the robust stabilization problem of a class of switched linear system with time-varying delay and uncertainty. A kind of robust state-feedback controller is constructed by using completeness condition and common Lyapunov function, the switching strategy is also designed. With the given switching laws, the controllers guarantee that the states of closed-loop systems asymptotically converge to equilibrium point. The results are proved to be valid by simulation at last.

The summary and the problems which can be more investigated are given at the end of the thesis.

Keywords: switched systems; time-delay; Lyapunov function

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 课题背景和研究意义	1
1.1.1 混杂系统研究概述	1
1.1.2 时滞系统概述	2
1.2 切换系统研究概述	4
1.2.1 切换系统概述	4
1.2.2 切换系统研究现状和方法	7
1.3 时滞切换系统	9
1.3.1 时滞切换系统概述	9
1.3.2 时滞切换系统研究概况	10
1.4 本文工作	10
第二章 预备知识	13
2.1 李亚普诺夫稳定定理	13
2.1.1 李亚普诺夫第一方法和第二方法	14
2.2 李亚普诺夫研究方法	15
2.2.1 共同李亚普诺夫方法	15
2.2.2 多李亚普诺夫方法	16
2.3 鲁棒控制理论	17
第三章 时滞切换系统的鲁棒控制器设计	20
3.1 引 言	20
3.2 系统描述	20
3.3 主要结果	21
3.4 仿 真	24
3.5 小 结	25
第四章 不确定时滞切换系统的鲁棒控制	26
4.1 引 言	26
4.2 问题的描述	26
4.3 主要结果	27
4.4 仿 真	33
4.5 小 结	35
第五章 时变时滞切换系统的鲁棒控制	36
5.1 引 言	36
5.2 问题的描述	36
5.3 主要结果	37
5.4 仿 真	39
5.5 小 结	40
第六章 结束语	42

参考文献	44
作者在攻读硕士期间发表的论文	49
致 谢	50

厦门大学博士论文摘要库

Contents

Chapter1 Introduction.....	1
1.1 Research background and meaning.....	1
1.1.1 Summary of Hybrid dynamic system.....	1
1.1.2 Summary of system with time-delay.....	2
1.2 Switched systems.....	4
1.2.1 Summary of switched systems.....	4
1.2.2 Research contents and status of switched systems.....	7
1.3 Switched systems with time-delay.....	9
1.3.1 Summary of switched systems with time-delay.....	9
1.3.2 Research contents and status of switched systems with time-delay.....	10
1.4 Main work of this paper.....	10
Chapter2 Preliminary concepts.....	13
2.1 Lyapunov stability theory.....	13
2.1.1 The first and second way of Lyapunov.....	14
2.2 Lyapunov research ways.....	15
2.2.1 Common Lyapunov way.....	15
2.2.2 Multiple Lyapunov way.....	16
2.3 Robust control theory.....	17
Chapter3 Robust stabilization of switched system with time-delay...20	
3.1 Introduction.....	20
3.2 Description of switched systems.....	20
3.3 Main results.....	21
3.4 Simulation.....	24
3.5 Conclusion.....	25
Chapter4 Robust stabilization of uncertainty switched system with time-delay.....	26

4.1 Introduction.....	26
4.2 Description of switched systems.....	26
4.3 Main results.....	27
4.4 Simulation.....	33
4.5 Conclusion.....	35
Chapter5 Robust stabilization of time-varying switched system with time-delay.....	36
5.1 Introduction.....	36
5.2 Description of switched systems.....	36
5.3 Main results.....	37
5.4 Simulation.....	39
5.5 Conclusion.....	40
Chapter6 Conclusion.....	42
Reference.....	44
Published papers of author.....	49
Acknowledgements.....	50

第一章 绪 论

随着当代科技技术的重大变革,在工程技术、社会经济、生物生态等领域出现了许多复杂的系统。这些系统往往既包含连续变量动态系统又包含离散事件动态系统,因而称之为混杂动态系统(或混合动态系统 Hybrid dynamic systems)^[1]。上个世纪六十年代,控制界开始对混杂动态系统理论进行研究,并获得了许多成果^[2-3]。随后,一类重要的混杂动态系统——切换系统(Switched systems)的研究更是成为广大控制工作者研究的焦点,并在稳定性、鲁棒控制、最优控制等方面获得了重要成果。

1.1 课题背景和研究意义

1.1.1 混杂系统研究概述

混杂动态系统是既包含离散事件动态系统又包含连续变量动态系统,并且两者相互作用的系统。与一般的系统相比,混杂动态系统能更精确合理地刻画现实世界中的各种问题。混杂动态系统的提出就是由于离散事件的深入研究和现代工业过程控制的需要。近些年来,混杂动态系统的研究和应用发展迅猛,特别是计算机技术的飞速发展,为混杂系统实施控制提供了坚实的技术基础和广阔的发展前景。随着系统的规模越来越大,内容也越来越丰富,表现出来的现象就越来越复杂。如何对混杂动态系统进行控制和管理,以及如何处理更为复杂的控制系统和提供更为有效的控制策略改善系统的运行状态,提高运行效益,这些都是人们面临的重大课题。

混杂动态系统的研究对象非常广泛,例如在工业当中,按照产品制造流程,机器对零部件加工是属于一个连续动态过程;但是只有当零部件到达机器的时候机器才进行加工,这又属于一个离散的动态过程。又比如在日常生活当中经常使用的冰箱等制冷设备,这个系统包含有开和关的两个离散动态过程。当环境温度被检测高于一定水平的时候,系统就开始制冷,制冷后的过程就属于一个连续动态过程;反之当环境温度被检测低于一定水平的时候,系统就停止制冷,停止制冷后的过程属于一个连续动态过程。因此在这些过程中,必须使用混杂动态

系统来完整的描述整个过程。另外,混杂动态系统在描述复杂系统的分层结构时也很有用,例如空中交通管理系统、计算机通讯网络以及化工过程控制系统等。在现实生活中可以找到许许多多的混杂动态系统的例子,而且由于混杂动态系统在实际应用和理论研究上都具有重要价值,所以近几十年来受到了控制界和计算机理论界的广泛关注。

混杂动态系统于 1966 年被 H. S. Winstsenhause 在 IEEE AC 上的一篇文章^[2]里提出,这标志着混杂动态系统研究的开始。而此后的二十年间混杂动态系统的研究没有多大进展,直到八十年代末,混杂动态系统理论才得到全面的研究。1986 年由美国国家基金会和 IEEE 控制系统协会召集美国控制界知名学者,在美国加州 Santa Clara 大学举行了一次关于控制科学今后发展的专题讨论会,在会议报告《对于控制的挑战——集体的观点》^[4]上,再一次提出了混杂动态系统。引起了世界上控制界、计算机界以及应用数学界许多学者的浓厚兴趣。随后混杂动态系统理论研究成为控制领域中的一个新的热点。二十世纪九十年代以来,世界上许多国家召开的关于混杂动态系统学术会议论文集中都发表了有关混杂动态系统的文章^[5-6]。几个主要国际期刊,如《IEEE Transaction on Automatic Control》、《System & Control Letters》等都出版了混杂动态系统的专刊^[7-8]。1996 年,在第十三届 IFAC 大会上由 Labinaz, Bayoumi 和 Rudie 发表了一篇混杂动态系统的综述文章^[9],表明混杂动态系统的研究已取得丰富的成果。随后十来年,许多控制领域的学者对混杂动态系统进行了更广泛、更深入的研究,混杂动态系统的研究取得了许多重要的成果。世界上许多大学和研究机构都成立了关于混杂动态理论与应用的研究,并形成了自己的研究特色。

1.1.2 时滞系统概述

时滞与时滞系统是客观世界与工程技术中普遍存在的实际问题。时滞系统已应用于通讯、交通、电力、环境保护、化工过程、生态、经济等诸多领域。刘永清教授在 1957~1960 年,研究了火箭发动机燃烧时滞控制系统的不稳定性^[10]。1978 年后,又从化工测量仪表控制工程实际中开展了时滞系统的稳定与控制研究^[11]。在大量的实际控制系统中,由于信号的传递、变量的测量以及系统设备所具有的一些物理特性等各种因素,时滞的影响往往是不可避免的^[12],如多级火箭

燃烧、机械传动系统、信号传输系统、大型电网系统、网络控制系统、电感器等。由于时滞系统有着很广泛的应用背景，它受到了许多学者的关注^[10-12]。在实际工程系统中，时滞往往是系统不稳定和系统性能变差的主要原因，所以对时滞系统的研究显得很重要。

时滞系统的数学模型实际上是由泛函微分方程来描述的，其状态空间是连续函数空间，参数是时间分布的，所以时滞系统是一类特殊的分布参数系统。二十世纪五十年代末以来，泛函微分方程和微分差分方程发展非常迅速。在许多方面都取得了重要成果。二十世纪七十年代以后，无穷时滞和无界滞后量的泛函微分方程也跟着兴起，进一步促进了时滞系统理论的发展。我国学者在时滞系统的研究方面也取得了一些成果。目前，时滞系统研究结果主要分为两类：定常时滞和时变时滞（时滞往往是随着时间变化）。

时滞系统的一般模型可用如下的微分方程来描述^[13]

$$\dot{x}(t) = f(x(t), x(t - \tau_1), \Lambda, x(t - \tau_i)) \quad \tau_i > 0 \quad i \in \{1, 2, \Lambda, N\} \quad (1.1)$$

其中 τ_i 为时间滞后量， $x(t)$ 表示系统 t 时刻的状态， $x(t - \tau_i)$ 表示系统相对于 t 时刻第 i 个滞后状态，即为系统 $t - \tau_i$ 时刻的状态。当式(1.1)中的 $i = 1$ 时，此时系统称为单时滞系统。当式(1.1)中的 $i > 1$ 时，我们称系统为多时滞系统。

下面给出时滞系统的一些实际应用例子。

例 1.4^[14] 在近代核物理中用计数器测量质点源强度，引出的方程：

$$\dot{\pi}(t) = -a[\pi(t) - \pi(t - \tau)e^{-a\tau}]$$

例 1.5^[14] 考察信息网络中的无损传输线路，导出如下的方程：

$$u(t) - K[u(t) - \frac{2}{s}] = f[u(t), u(t - \frac{2}{s})]$$

例 1.6^[14] 考虑麻疹传播的 Lonbon 与 Yorke 模型。以 $s(t)$ 表示在时刻 t 无免疫力的个体数目， γ 为这种个体在人口中所占的比例， $\beta(t)$ 为人口特征函数。医学统计表明，麻疹传染的潜伏期上、下限为 14-12 天，因而得到有滞后量的微分方程

$$\dot{s}(t) = \beta(t)s(t)[s(t - 12) - s(t - 14) - 2\gamma] + \gamma$$

这里有两个滞后量 12 和 14。

1.2 切换系统研究概述

1.2.1 切换系统概述

“切换”作为一种控制思想^[15]，很早就在控制理论中得到了应用。在经典控制理论中为解决非线性系统出现的周期性震荡，特别是伺服系统的稳定问题^[16]，提出了开关伺服系统，即包含有继电器的伺服系统，简称继电系统。这种开关系统的一个最大优点是用非常简单的“开”与“关”操作很大的功率。受继电系统的相平面方法的启发而建立发展起来的一种系统综合方法——变结构控制，这两种方法也都是采用了“切换”作为其基本思想。

Antsaklis 在混杂动态系统的专刊里^[17]提出了混杂动态系统的三种类型，切换系统即为其中的一种。切换系统是由若干个子系统和一个切换策略构成，通过在各子系统之间进行切换实现预定的性能指标。切换系统在切换的过程中，每一时刻系统的状态只符合其中一个系统的规律，即切换规则确定每一时刻系统切换到哪一个子系统，系统的状态就在相应时刻切换到相应的子系统。切换系统在切换过程中，切换策略起着重要的作用，它将决定切换系统运行在哪一个子系统上。切换可以是时间或事件触发，由于这种切换的引用，整个系统常常表现出相当复杂的动态行为。切换系统与一般的系统相比较具有一定的复杂性和特殊性，切换系统并不是各个子系统的简单迭加，它可以具有子系统所不具有的性质。即其子系统的稳定性不等价于整个系统的稳定性。如果切换系统选择不同的切换策略，其系统稳定性可以得到截然不同的结果。也就是说，即使每个子系统都存在切换李亚普诺夫函数，仍需对切换策略进行限制才能保证整个切换系统的稳定性，如果切换策略选择不当，也是可以导致整个系统的不稳定；但是相反的，也存在这样的系统，即使切换系统的每个子系统都不稳定，但是通过构造一个适当的切换策略仍然可能使整个切换系统切换稳定，从而实现了一般系统不能实现的性能。

切换系统具有广泛的实际应用背景^[18-19]，如在电力系统、计算机磁盘驱动器、机器人行走控制、交通管理、车摆系统的控制等有着广泛的应用，还有在工程上广泛应用的分区 PID^[20]、模糊控制^[21]都可以归入切换系统。切换系统已引起了国内外学者的广泛关注^[22-23]。切换系统基本结构如图 1.1 所示^[24]。

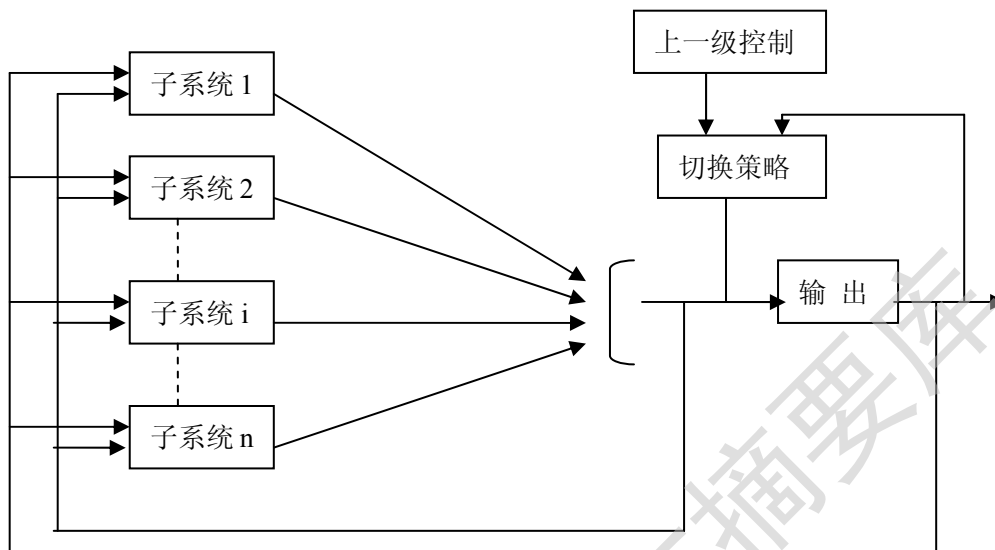


图 1.1 切换系统示意图

对于自治切换系统，一般用如下的微分方程来描述^[30]：

$$\dot{x}(t) = f_i(x(t)) \quad (1.2)$$

其中： $i \in \{1, 2, \dots, m\}$ m 是自然数，表示切换系统的 m 个子系统， $f_i : R^n \rightarrow R^n$ 表示充分光滑的非线性函数。

相应地，当 f_i 为线性函数时，系统(1.2)描述成如下的线性切换系统

$$\dot{x}(t) = A_i x(t) \quad (1.3)$$

这里 $i \in \{1, 2, \dots, m\}$ ， $A_i \in R^{n \times n}$ 。

下面给出两个实例来说明切换系统的应用背景。

例 1.1 计算机磁盘驱动器切换系统^[18]

在计算机磁盘驱动器中，驱动磁头沿盘面径向位置运动以寻找目标磁道位置的机构叫磁头定位驱动机构。精密、快速的磁头驱动定位切换系统是实现高密度存储、高速存取的最基本的技术保证。为了使磁头快速精确地定位，必须采用闭环控制方式。除了有电机驱动机构以外，还应有位置检测机构和速度控制机构反馈磁头当前所在位置及运动速度，根据磁头当前位置和目标位置的差值切换磁头

运动的速度和方向，以逐步精确定位目标磁道。图 1.2 描述了磁盘驱动器的结构。

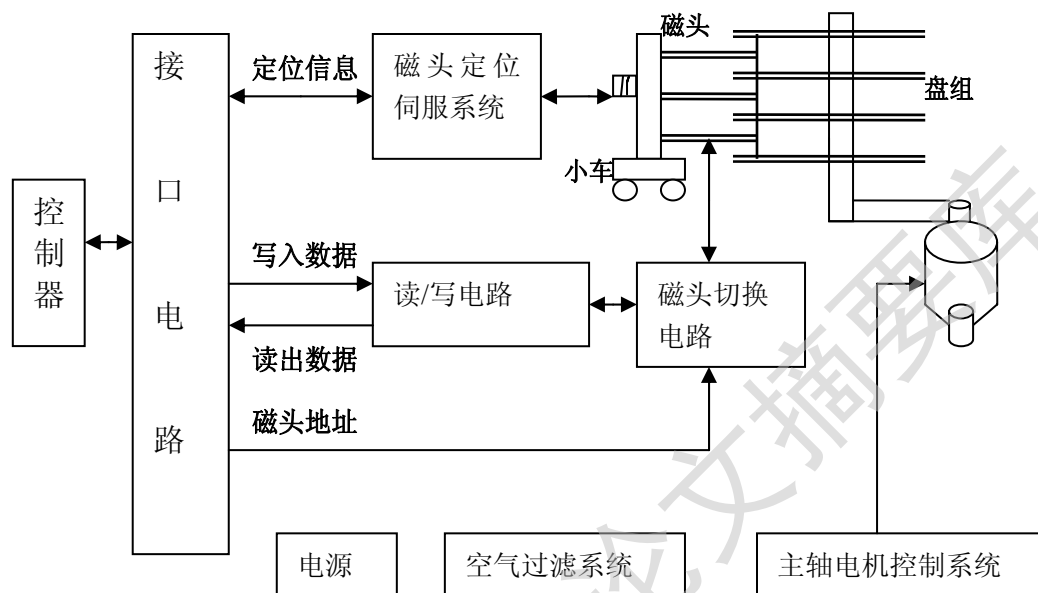


图 1.2 磁盘驱动器机构图

例 1.2 温度调节装置切换系统^[25]

某工厂高温室通过温度调节装置把温度控制在 $75 \pm 5^\circ\text{C}$ ，当房间温度降到 68°C 与 70°C 之间时，启动散热器加热；当温度升至 80°C 与 82°C 之间时，关闭散热器降温。其中，房间温度 x 是连续变化的，即 $x(t) \in R$ 是连续变量；而散热器的开与关是离散事件，即 $q \in \{on, off\}$ 是离散变量。系统的温度调节模型、房间温度变化曲线和散热器开/关切换分别如图 1.3(a)、1.3(b)和 1.3(c)所示。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库